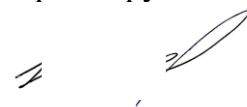


На правах рукописи



Шитов Иван Дмитриевич

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТА СО СТАТОДИНАМИЧЕСКИМИ
ОСОБЕННОСТЯМИ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2025

Работа выполнена на кафедре вычислительной математики, механики и биомеханики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
г. Пермь (ФГАОУ ВО «ПНИПУ»)

Научный руководитель: **Столбов Валерий Юрьевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Лосев Александр Георгиевич,**
доктор физико-математических наук, профессор,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный университет»,
профессор кафедры «Математический анализ и теория
функции», г. Волгоград

Иванов Дмитрий Валерьевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н.Г.
Чернышевского», профессор кафедры «Математическая
теория упругости и биомеханики», г. Саратов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Защита состоится «18» сентября 2025 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.21 по адресу: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 345.

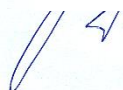
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (www.pstu.ru).

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат экономических наук,
доцент



Алексеев Александр Олегович



I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время всё большую популярность набирает трехмерное исследование объектов во всех сферах деятельности человека. Одним из наиболее распространённых методов получения и создания трехмерной копии объекта становится фотограмметрия. Развитие фотограмметрии в целом и цифровых методов фотограмметрической обработки снимков обеспечиваются применением новых технических и программных средств. Основным методом фотограмметрической обработки является цифровой метод обработки изображений. Этот метод позволяет получать принципиально новые данные: трехмерные изображения рельефа и объекта в целом, выполнять автоматизированное распознавание объектов на многозональных снимках в различных областях знаний. Существует два основных направления прикладной фотограмметрии: создание планов и карт рельефа поверхности Земли в топографии и создание трехмерных объектов в промышленном конструировании, архитектуре, а также в медицине.

Фотограмметрия в медицине и ветеринарии преимущественно используется для диагностики заболеваний, связанных с нарушением нормальной структуры поверхности живых объектов. Так, трехмерные модели могут использоваться в антропологии для оценки рельефа человеческих останков, судебной медицине для посмертной оценки рельефа травматических поражений, офтальмологии для анализа деформации поверхности склеры, хирургии для моделирования органов, подлежащих иссечению, а также в процессе обучения врачей для виртуализации патологических изменений органов. В медицинской практике используются ряд оптических методов для оценки геометрии трехмерных объектов. К таким методам относятся муаровая топография, *Image and Scanner Interface Specification (ISIS)* сканирование, компьютерная оптическая топография, в том числе технологически близкие методы, исполняемые на установках *DIERS Formetric 4D (DIERS, DIERS International GmbH, г. Шпангенбад Германия)* и *Electro Optical System (EOS)*. Однако непосредственно фотограмметрический метод диагностики в медицине используется не так давно и принципиально разделяется на группы: фотограмметрия одной камерой, фотограмметрия несколькими камерами и *SFM*-фотограмметрия (пер. с англ. «*structure from motion*»), последняя из которых является наиболее технологически сложной в исполнении. В последнее десятилетие изучением возможностей применения данного метода для анализа геометрии позвоночного столба и лица за рубежом занимались такие ученые, как M.L.M. Maddaluno (2021), L.R. Pivotto (2021), P. Lussu (2020), I. Dixit (2019), J.S. Leal (2019), A.S. Alexandre (2019), K.R. Saad (2012) и др. В России последние ключевые результаты в области биофотограмметрии освещены в исследованиях Т.Н. Скрыпициной (2018), А.М. Абдульмунаема (2010), М.М. Соловьева (2011) и других.

Для создания трехмерного изображения объекта методом фотограмметрии необходимо собрать и обработать коллекцию снимков объекта, выполненных с разного ракурса. Однако, если объект имеет свои уникальные статодинамические параметры, то анализ трехмерного изображения этого объекта становится нетривиальной задачей. Статодинамические особенности

объекта могут создавать различные шумы и артефакты, что делает невозможным получение достоверных геометрических характеристик, а, следовательно, и качественный анализ объекта. В свою очередь использование методов одномоментного получения трехмерного изображения объекта требует применения специализированного оборудования и временных затрат, что зачастую невозможно в сферах, где необходима быстрая скрининг-диагностика объекта в режиме реального времени.

Таким образом, разработка интеллектуальной системы сбора и анализа уникальных характеристик трехмерных изображений живых объектов, полученных методом фотограмметрии, является актуальной задачей в свете распространения новых технологий компьютерного зрения и интеллектуального анализа данных. Современные достижения в области обработки трехмерных моделей и веб-технологии делают возможным доступ к таким инструментам широкому кругу лиц. Такая система позволит проводить неинвазивную диагностику различных патологических состояний здоровья человека без нанесения вреда и использования дорогостоящего оборудования. Однако на сегодняшний день не существует унифицированной методики количественного анализа трехмерных моделей, полученных с помощью фотограмметрии. Разработка такого инструмента будет иметь практическое значение для медицинской диагностики и позволит расширить возможности фотограмметрических измерений в медицине в целом.

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является повышение доступности анализа пространственных изображений живых объектов со статодинамическими особенностями, полученных методом стереофотограмметрии, с обеспечением заданной точности за счет создания интеллектуальной системы обработки информации на основе математических и нейросетевых алгоритмов, а также веб-технологий.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Провести критический анализ существующих методов создания и обработки изображений объектов со статодинамическими особенностями.
2. Разработать концептуальную модель интеллектуальной системы обработки пространственных изображений объекта со статодинамическими особенностями.
3. Разработать алгоритмы подготовки двумерных и трехмерных цифровых изображений живых объектов.
4. Разработать интеллектуальную систему обработки трехмерных изображений объектов с определенными статодинамическими особенностями.
5. Провести тестирование разработанных алгоритмов, а также сравнительный анализ результатов предложенных методов обработки трехмерных изображений объектов.
6. Провести апробацию и внедрение интеллектуальной системы обработки трехмерных изображений объектов со статодинамическими особенностями.

Объект исследования: двумерные и трехмерные изображения живых объектов, полученные методом стереофотограмметрии, и имеющие статодинамические особенности.

Предмет исследования: методы и алгоритмы обработки, анализа и интерпретации уникальных признаков трехмерных изображений живых объектов, полученных методом стереофотограмметрии.

Методология и методы исследования. В работе применялись методы системного и статистического анализа, теории алгоритмизации и программирования, технологии стереофотограмметрии.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Решение рассматриваемой научной проблемы предполагает научные исследования и технические разработки, включенные в формулу научной специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика:

1. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации (п. 5).

2. Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации (п. 12).

3. Методы получения, анализа и обработки экспертной информации (п. 13).

Научная новизна исследования. В диссертации получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Разработаны оригинальные алгоритмы получения и обработки трехмерных изображений живых объектов методом стереофотограмметрии, отличающиеся дополнительной предобработкой изображений, что позволяет получить трехмерную модель объекта с более высоким уровнем детализации, благодаря нивелированию статодинамических особенностей (новизна: кроме стереофотограмметрии использованы методы фильтрации и «карт глубин»).

2. Разработаны новые нейросетевые модели определения уникальных признаков живых объектов со статодинамическими особенностями на примере поверхности спины и лица человека (новизна: подобраны эффективные гиперпараметры нейросетевой модели для определения реперных точек поверхности спины и лица).

3. Разработаны методы анализа уникальных признаков живых объектов на основе экспертных знаний, отличающиеся формированием протоколов диагностики, автоматизированным подходом и облачной реализацией (новизна: автоматизированные алгоритмы поиска реперных точек).

4. Разработана интеллектуальная система анализа пространственных изображений объекта со статодинамическими особенностями, отличающаяся использованием запатентованного способа дистанционного исследования живых объектов (на примере поверхности спины и лица человека) без необходимости применения дополнительного оборудования (новизна: расчет не абсолютных параметров пространственного взаимоотношения, а анализ «виртуальной модели» опосредованно через фотограмметрию).

Теоретическая значимость заключается в развитии методов анализа пространственных изображений живых объектов со статодинамическими особенностями.

Практическая значимость состоит в использовании разработанной диагностической интеллектуальной системы в качестве инструмента ранней

диагностики развития некоторых нарушений здоровья человека путем определения и анализа количественных характеристик цифровых биологических моделей. Применение предложенных в диссертации алгоритмов позволило проводить удаленную скрининг диагностику состояния позвоночного столба или геометрии лица, а также в режиме реального времени получать дополнительные рекомендации и корректировку лечения от врача. Система позволяет осуществлять непрерывный мониторинг за состоянием здоровья без дополнительной лучевой нагрузки (как при рентгеновском исследовании), тем самым выступая превентивной мерой оценки и контроля развития патологического состояния. Практическая ценность работы состоит также в том, что разработанные алгоритмы могут быть использованы для повышения эффективности построения трехмерного изображения живого объекта и определения его уникальных признаков, связанных со статодинамическими особенностями, т. е. применяться не только в области медицины, но и в других предметных областях.

Достоверность результатов диссертации подтверждается результатами сравнения с подтвержденными методами оценки состояния позвоночного столба (общепринятые методы компьютерной оптической топографии и рентгенографии), тестирования искусственной нейронной сети на тестовых и подтверждающих выборках, а также результатами внедрения и опытной эксплуатации разработанных алгоритмов в трех лечебно-профилактических учреждениях города Перми.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концептуальная модель интеллектуальной системы обработки пространственных изображений живого объекта со статодинамическими особенностями.
2. Интеллектуальная система обработки трехмерных изображений живых объектов с определенными статодинамическими особенностями.
3. Математический метод обработки трехмерных изображений живых объектов с определенными статодинамическими особенностями.
4. Нейросетевой метод обработки трехмерных изображений живых объектов с определенными статодинамическими особенностями.
5. Мобильное приложение на платформах для распространения мобильных приложений, работающие на разных операционных системах: *Google Play* (*Google LLC*, Маунтин-Вью, Калифорния, США) и *AppStore* (*Apple Inc.*, Купертино, Калифорния, США) для обработки трехмерных изображений живых объектов с определенными статодинамическими особенностями.

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены и используются в клинической практике Клинического санатория профилактория «Родник» (Пермь), также система использовалась при ежегодной диспансеризации детей в закрытом административно-территориальном образовании (ЗАО) Звездный (Пермский край). Система внедрена в лечебно-диагностический процесс Государственного автономного учреждения здравоохранения Пермского края «Городская клиническая больница №4» (ГАОУЗ ПК «ГКБ №4») и частном лечебно-профилактическом учреждении ООО «Йорд Мед» (Пермь). На сегодняшний день создано и опубликовано мобильное

приложение на платформах для распространения мобильных приложений, работающих на разных операционных системах *Google Play* и *AppStore*, тем самым любой родитель может воспользоваться системой удаленно, находясь в любом месте. Акты внедрения результатов диссертационной работы прилагаются к диссертации. Разработанный в рамках диссертационного исследования программный продукт внесен в реестр отечественного программного обеспечения (ПО) (Реестровая запись №13946 от 14.06.2022 г.).

Апробация результатов исследования. Результаты научно-исследовательской работы, полученные во время исследования, докладывались и обсуждались на семинарах кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (2020–2024 гг.); докладывались соискателем на 2-х международных конференциях: I Международная научно-практическая конференция «Искусственный интеллект. Формирование будущего» (Краснодар. 29 апреля 2024 г.); международная научно-практическая конференция «Научные достижения и инновационные подходы» (Краснодар. 10 июля 2024 г.); а также на региональной научно-практической конференции по цифровой клинической биомедицине «PermDigitalBioMed-2022» (Пермь. 18 ноября 2022 г.). Разработанная ИС, как коммерческий продукт, презентовалась на следующих выставках: VIII Российский конгресс с международным участием «Физическая и реабилитационная медицина» (Москва. 16–17 декабря 2024 г.); 30-я юбилейная выставка-форум «МедФарм-2024» (13-15 ноября 2024 г.); IX Международная специализированная медицинская выставка «Здравоохранение. Крым 2024» (Ялта. 25–27 сентября 2024 г.); конференция NeuroTech Russia 2024 (Москва. 20 ноября 2024 г.); конференция NeuroTech Russia 2023 (Москва. 16 февраля 2023 г.).

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы развития Пермского научно-образовательного центра (НОЦ) «Рациональное недропользование» (подпроект «Новые материалы и технологии для медицины»).

Публикации. Основные научные положения и результаты диссертации представлены в 13 научных публикациях, в том числе 7 статей в изданиях из Перечня ВАК РФ, из них 3 статьи из МБЦ *Scopus*, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 патент на изобретение, 2 материала докладов на международных научно-практических конференциях.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения, списка использованной литературы и 9 приложений. Общий объём – 242 стр. из которых: оглавление – 4 стр., основного текста – 181 стр. (таблиц – 18, рисунков – 70), библиография – 19 стр. (170 наименований), приложения – 27 стр.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы исследования, цели и задачи работы, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов диссертации, а также

представлены сведения об апробации работы и публикации основных научных положений и результатов в открытой печати.

В первой главе выполнен обзор предметной области, включающий сравнительный и системный анализ современных цифровых методов обработки трехмерных изображений объектов с определенными статодинамическими особенностями, в том числе способы их создания и динамического отображения на мобильных устройствах с использованием веб-технологий. Рассматриваются актуальные области применения цифровых моделей. Особое внимание уделено оптическим методам получения трехмерных моделей в медицине, в частности для диагностики сколиоза и лицевых нарушений, так как они обеспечивают безопасную, неинвазивную и экономически обоснованную альтернативу общепринятым методам пространственной визуализации, таким как рентгенография и компьютерная рентгеновская томография. В частности, фотограмметрия является перспективной технологией в биомедицинских науках, поскольку она позволяет получать точные и воспроизводимые измерения геометрических параметров позвоночника, а также обеспечивает высокую скорость измерений и позволяет проводить анализ большего количества данных по сравнению с другими методами оптической диагностики, используемыми применительно к объектам со статодинамическими особенностями. Метод фотограмметрии включает использование изображений объекта, снятых с разных углов, и создание облака точек, которое служит основой для создания трехмерной модели объекта. Специальный алгоритм обрабатывает набор фотографий с использованием фотограмметрического модуля *Metashape* (ООО «Живой софт», г. Санкт-Петербург, Россия), который выбирает ключевые точки на них и сопоставляет по ним изображения. Облако точек затем обрабатывается и восстанавливается в трехмерную модель объекта доступную для отображения на веб-страницах при помощи специальной библиотеки для рендеринга графики *Three.js (mrdoob)* на базе технологии *WebGL (Khronos Group, Бивертон, США)*.

На основе проведенного литературного обзора описан процесс становления и развития фотограмметрии с указанием ключевых этапов и имен авторов идей, положенных в основу развития фотограмметрического метода и разработанных на их основе систем.

Для анализа полученных графических моделей, включая поиск присущих им характерных особенностей, предложено и обосновано использование методов компьютерного зрения на базе сверточных нейронных сетей. Описаны способы количественной оценки характеристик трехмерных изображений.

Во второй части первой главы выявлены современные проблемы получения, распознавания и визуализации объектов в пространстве, основанные на существующих ограничениях математических и нейросетевых алгоритмов и оказывающие влияние на скорость и точность распознавания, эффективность обучения нейронных сетей и адаптацию к новым условиям съемки. Отдельно выделены ограничения цифровой диагностики в медицине, влияющие на получение безопасным способом детализированных данных о состоянии

здоровья пациента для их унифицированной оценки. Обозначена важность и способы их преодоления. Рассмотрены преимущества предложенных методик.

Во второй главе представлен процесс разработки концептуальной модели исследования, описывающей основные концепции, связи и процессы, участвующие в исследовании для определения его целей и направлений, и установления причинно-следственных связей между различными аспектами. Приводится описание целевой аудитории, проблемы, которые возникают, и запрос на их решение.

Предложенная концептуальная модель исследования направлена на разработку цифровой интеллектуальной системы обработки дву- и трехмерных медицинских изображений объектов, полученных при помощи метода фотограмметрии, и включает в себя структурную (Рисунок 1) и функциональную модели.

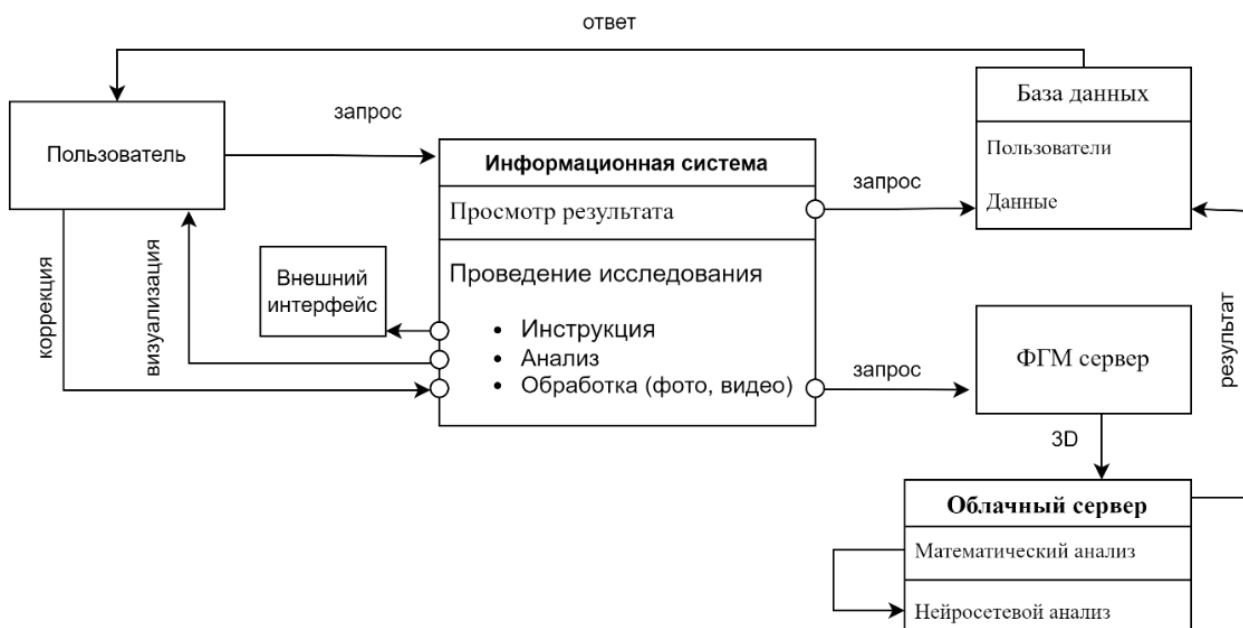


Рисунок 1 – Структурная схема интеллектуальной системы

Система представляет собой распределенное приложение на основе микросервисов, предназначенное для обработки фотографий, загруженных пользователем, с целью создания трехмерных моделей и их анализа. Она состоит из клиентской части (frontend), головного сервера (контроллера), рабочего узла (Сервер 1) и четырех специализированных функциональных модулей:

1. Модуль получения трёхмерного изображения методом стереофотограмметрии.
2. Модуль обработки полученных трехмерных изображений методами фильтрации и математическими алгоритмами.
3. Модуль определения уникальных признаков исследуемого объекта методами математического и статистического анализа (в том числе с помощью нейронных сетей).
4. Модуль анализа уникальных признаков исследуемого объекта математическими методами. Система использует *REST API*, очереди сообщений

и продвинутые вычислительные инструменты для генерации *PDF*-отчета (*Portable Document Format*) и интерактивной трехмерной модели.

В третьей главе представлены этапы разработки интеллектуальной системы обработки трехмерных изображений объектов с определенными статодинамическими особенностями, представляющей собой совокупность аппаратных и программных средств, обеспечивающих сбор, хранение, поиск и передачу персонифицированных данных о состоянии здоровья пациента по определенным правилам и процедурам. Приведена классификация существующих интеллектуальных систем и методов анализа данных, рассмотрены их преимущества и недостатки.

Представлены различные компоненты, характерные для разрабатываемой цифровой интеллектуальной системы, такие как входные и выходные данные в виде текстовой или многомерной графической информации; система хранения и управления базами данных, построенная на основе использования *PostgreSQL* (*PostgreSQL Global Development Group*) и применяемая для хранения входных и выходных данных, а также предоставления доступа к данным из разных источников; система передачи данных, предназначенная для их передачи между компонентами интеллектуальной информационной системы. Представлены характеристики и технические особенности интеллектуальной системы, требования к обеспечению ее стабильной непрерывной работы. Приведены структура и описание работы программного обеспечения, построенного на основе разработанных алгоритмов и программ и включающего серверную и клиентскую части.

Подробно описаны разработанные математические и нейросетевые алгоритмы цифрового анализа графических данных, используемые для поиска анатомических ориентиров на поверхности исследуемого объекта и проведения на основе их положения и цвета анализа симметрии и гармонии лица или деформации позвоночника.

Для нормализации позиционирования трехмерной модели позвоночника была проведена коррекция расположения плоскостей с помощью матрицы двойной репозиции:

$$A \times B = \begin{bmatrix} \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}.$$

При описании линии позвоночника использовалась подобная топография кривой N_0O (Рисунок 2), которая определяется особенностью идентификации точек N_0 и O . Согласно алгоритму программного инструмента *ScolView*® точка O определяется как вершина межъягодичной складки, которая топографически соответствует сочленению крестца и копчика, тогда как точка N_0 определяется как середина кривой N_1N_2 , представляющая собой линию пересечения горизонтальной плоскости с наиболее узкой частью трехмерной моделью тела в области шеи.

Наиболее актуальной проблемой идентификации позвонков в проекции кривой N_0O являются геометрические особенности отдельных позвонков,

поскольку каждый из позвонков характеризуется уникальными показателями высоты, угла наклона тел позвонков и их остистых отростков, чьи вершины формируют проекцию кривой N_0O даже в идеальных условиях нормы. Поэтому, рационально разделить кривую N_0O на пропорциональные по протяженности сегменты, соответствующие тем или иным позвонкам.

Для унификации подхода в достижении цели настоящего исследования было принято решение о разделении кривой N_0O на 17 равных сегментов (далее – V -сегмент), которые были обозначены как V_0-V_1 , V_1-V_2 , V_2-V_3 , V_3-V_4 , V_4-V_5 , V_5-V_6 , V_6-V_7 , V_7-V_8 , V_8-V_9 , V_9-V_{10} , $V_{10}-V_{11}$, $V_{11}-V_{12}$, $V_{12}-V_{13}$, $V_{13}-V_{14}$, $V_{14}-V_{15}$, $V_{15}-V_{16}$, $V_{16}-V_{17}$, где расположение точки V_0 совпадает с положением N_0 , а O — V_{17} соответственно (Рисунок 2). Поэтому здесь и далее для унификации номенклатуры кривая N_0O будет рассматриваться как ломаная N_0O , представленная последовательностью из семнадцати перечисленных сегментов.

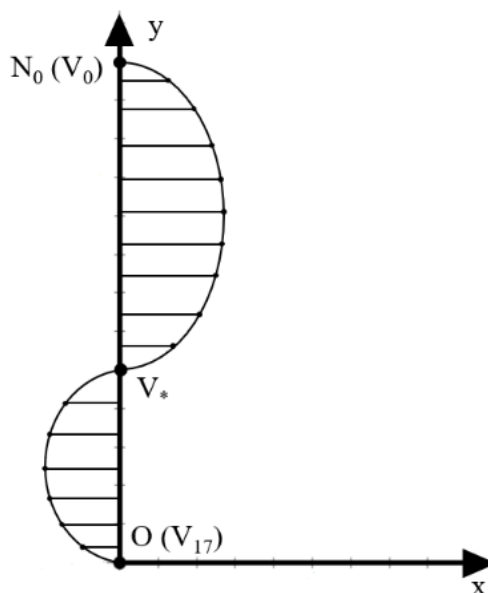


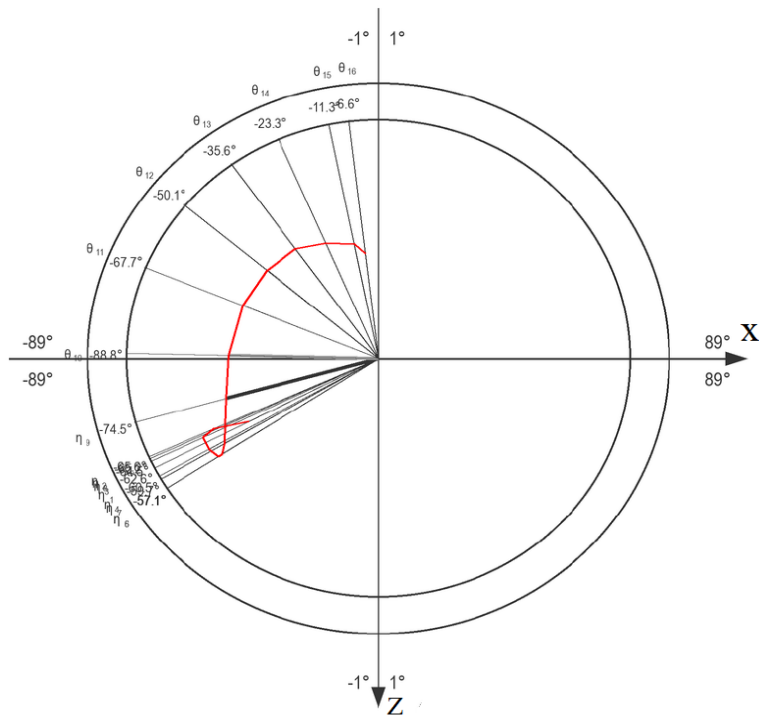
Рисунок 2 – Общий вид кривой N_0O после стратификации V -сегментов (вид во фронтальной плоскости xy)

Уникальностью подхода является расчет угла ротации отдельных позвонков, при этом значение угла $V''_n V'_n V_n$ рассчитывались по формуле:

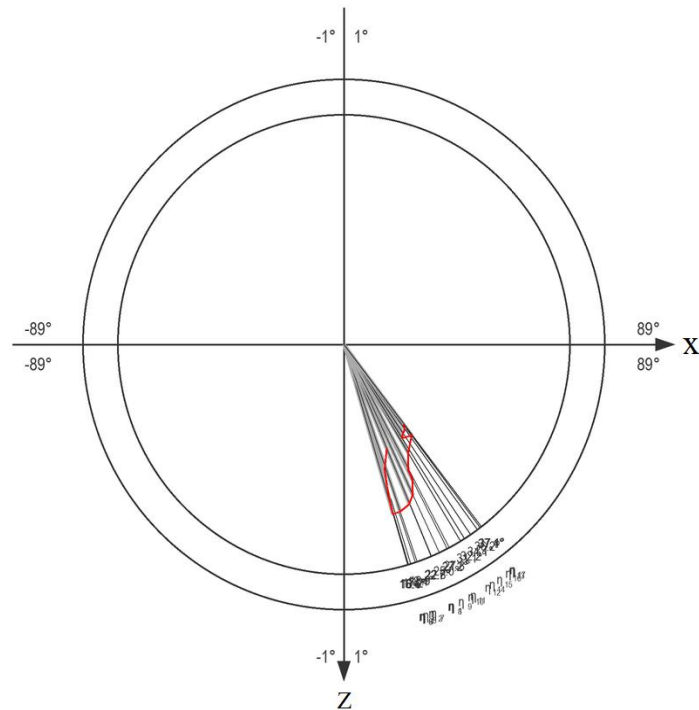
$$\angle V''_n V'_n V_n = \arctg \frac{V_n V''_n}{V'_n V''_n}.$$

Такая форма визуализации имеет следующее трактование. Модальность значения углов позволяет оценить направление ротации. Так отрицательные значения указывают на левостороннюю ротацию, а положительные - на правостороннюю. Размещение отрезков $V_n V'_n$ в верхних квадрантах позволяет отнести V -сегменты с соответствующим значением n к поясничному кифозу, тогда как положение отрезков $V_n V'_n$ в нижних квадрантах, позволяет идентифицировать V -сегмент с аналогичным значением n как принадлежащий к грудному кифозу.

Актуальность такого трактования более очевидна на Примере 2 (Рисунок 3).



Пример 1



Пример 2

Рисунок 3 – Примеры общего вида модифицированной круговой диаграммы ротации позвонков (проекция на горизонтальную плоскость), где красным – проекция кривой N_0O ; черным – проекция отрезка $V_nV'_n$ с максимальным значением угла; серым – проекция отрезка $V_nV'_n$ с максимальным

Так, судя по полученным данным длины $V_nV'_n$ и величины углов на Примере 2 видится очевидным наличие сколиоза, дуга которого направлена вправо, и будучи протяженной, включает в себя позвонки грудного и поясничного отделов на протяжении всех V-сегментов, при этом объективное значение максимального угла ротации составило $37,4^\circ$ в V_{17} -сегменте, что полностью соответствует современной теории развития сколиоза, как патологического процесса, манифестирующего в каудальной части позвоночника.

В главе подробно продемонстрировано использование веб-технологий для создания интерактивного веб-приложения для визуализации трехмерных данных. Проведено тестирование системы на предмет стабильности работы, отказоустойчивости и обработки заведомо ошибочных входных данных. Приведены результаты технических тестов, оценено быстродействие и эффективность интеллектуальной системы. Показано прикладное значение полученных результатов в области медицины и косметологии. Выходные данные, полученные с помощью алгоритмов доступны для наглядного отображения и количественной верификации.

В четвертой главе описаны и протестированы программы для диагностики деформации позвоночника (*ScolView*®) и оценки симметрии и гармонии лица (*FrontArt*®), входящие в интеллектуальную систему, основанную на построении трехмерных моделей методом фотограмметрии. Проводится качественное и количественное сравнение трехмерных моделей, полученных с помощью наиболее популярных на сегодняшний день программ фотограмметрической реконструкции *Metashape* и *Meshroom* (*AliceVision Association*, Европейский союз). Приводится обоснование использования *Metashape* в качестве модуля трехмерной реконструкции по плоским снимкам в разработанной интеллектуальной системе.

Для каждого из созданных программных продуктов проведен сравнительный анализ выходных данных, полученных с помощью разработанных алгоритмов, в сравнении с общепринятыми методами диагностики: рентгенографии и компьютерной оптической топографии.

Проведенная сравнительная оценка репрезентативности рентгенографического и фотограмметрического методов диагностики деформации позвоночного столба на основе анализа данных 4-х добровольцев показала, что отклонение кривых, полученных рентгенографическим и фотограмметрическим методами исследований позвоночника в боковой и сагиттальной проекциях, не превышает **5%** по отношению к высоте позвоночного столба. В результате сравнения моделей позвоночного столба, оценка полученных значений углов ротации сегментов позвоночника, а также величин перпендикуляров P_nV_n показала достаточный объем корреляционных связей с показателями компьютерной оптической топографии, которые указывают на репрезентативность *ScolView*® в идентификации деформации позвоночника. В качестве метода статистической оценки корреляционных связей был выбран непараметрический критерий Спирмена (S_R), среднее

значение которого составило $0,758 \pm 0,025$. Используемый в работе метод также продемонстрировал валидные значения угла Кобба, традиционно используемые при диагностике сколиоза.

В рамках тестирования программного продукта *FrontArt*® проведено сравнение положения анатомических точек на 1000 моделях, определенных нейросетевым алгоритмом. Полученные метрики оценки результатов работы нейронной сети и построенная матрица ошибок модели свидетельствуют о высокой точности (более **95%**) идентификации точек. При тестировании программного продукта *ScolView*® удалось достигнуть точность более **88%** при наблюдающейся закономерности: если убрать из оценки уникальные признаки, характеризующие таз, O – межгодовичная складка и B_1 и B_2 – левая и правая точки границы туловища на уровне межгодовичной складки, точность повышалась до **96%**, что может происходить из недостаточно хорошо сформированного дата сета, а именно при анализе поверхности спины, необходимо на фотографии наблюдать межгодовичную складку, но при формировании дата сета не на всех снимках она наблюдалась, так как интересующая область находится под нижнем бельем человека.

В работе также проведен сравнительный анализ полученных результатов тестирования разработанной интеллектуальной системы и методов цифровой обработки пространственных изображений с другими, широко используемыми в практике методами и системами, с точки зрения их достоверности и эффективности относительно существующих решений.

Продемонстрированы преимущества разработанной интеллектуальной системы в сравнении с рентгенографическим исследованием на предмет:

1. Доказанной точности – предложенная интеллектуальная система позволяет воспроизводить данные рентгенографии позвоночного столба с точностью до **5%**.
2. Безопасности использования – разработанная интеллектуальная система позволяет оценивать выраженность деформации позвоночного столба бесконтактно и без использования рентгеновского излучения.
3. Отсутствия противопоказаний – интеллектуальная система не имеет противопоказаний к использованию.
4. Требований к квалификации оператора – интеллектуальная система может эксплуатироваться без предшествующего обучения в рамках инструкции по эксплуатации.
5. Неограниченного масштабирования рабочих мест – интеллектуальная система используется исключительно при помощи персональных телекоммуникационных устройств – смартфонов, количество которых равно количеству рабочих мест оператора.
6. Экономической эффективности на проведение исследований с позиции временных (интеллектуальная система эффективнее в три раза по отношению к рентгенографическому методу: время однократной эксплуатации интеллектуальной системы составляет **3 мин** против 15 мин, необходимых для выполнения рентгенографии позвоночного столба в двух проекциях) и

финансовых затрат (стоимость эксплуатации интеллектуальной системы составляет **99 рублей** против 177 рублей, необходимых для выполнения рентгенографии позвоночного столба в двух проекциях согласно тарифному соглашению территориального фонда обязательного медицинского страхования Пермского края на 2025 г.).

Описаны результаты апробации и внедрения разработанной интеллектуальной системы и их практическая значимость. Подчеркнута важность процесса цифровизации в российской системе здравоохранения и ее потенциал для улучшения качества медицинских услуг.

В заключении кратко описаны научные и практические результаты, полученные автором в процессе исследований, описаны возможности практического применения разработанной интеллектуальной системы.

В приложении представлены результаты статистического анализа, акты, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы в медицинской и научной деятельности.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация направлена на разработку интеллектуальной системы анализа пространственных изображений человека. В проведенном исследовании были разработаны и обоснованы следующие основные результаты:

1. Разработаны методы обработки трехмерных изображений объектов со статодинамическими особенностями:

а. математический метод обработки трехмерных изображений объектов со статодинамическими особенностями с описанием исследуемого трехмерного объекта как математической функции.

б. метод вычисления основных признаков трехмерных изображений объектов со статодинамическими особенностями с использованием нейросетевой модели для анализа, который позволяет более точно учитывать характер закономерностей моделируемой предметной области.

2. Разработаны две нейросетевые модели для конкретных областей трехмерного объекта со статодинамическими особенностями (на примере головы и туловища человека). Была произведена оценка полученных нейросетевых моделей на тестовой выборке для каждой нейронной сети, определяющей уникальные признаки тела человека. Для нейронной сети, определяющей уникальные признаки поверхности спины, суммарная вероятность определения каждого уникального признака составила более **88%**, а при исключении из выборки точек таза точность нейросетевой модели повысилась до **96%**. Для нейронной сети, определяющей уникальные признаки поверхности лица, аналогичное значение точности составило более **98%**.

3. Разработана интеллектуальная система для диагностики нарушения осанки исследуемого объекта, а также для построения индивидуальных рекомендаций с формированием экспертного текстового и иллюстративного заключения в формате *PDF*.

4. Разработана интеллектуальная система для диагностики лицевых изменений и оценки гармонии лица исследуемого объекта с формированием экспертного текстового и иллюстративного заключения в формате *PDF*.

5. С помощью разработанной интеллектуальной системы проведена серия экспериментов и сравнений с общепризнанными методами диагностики, показавших отклонение по расположению точек менее чем **5%**, что говорит о возможности применения разработанного решения для объективной оценки состояния позвоночника наравне с рентгенографией и компьютерной оптической топографией.

6. На основе разработанных методов созданы 2 мобильных приложения для диагностики нарушений осанки (программное обеспечение для смартфона *ScolView*®) и анализа лицевых изменений (программное обеспечение для смартфона *FronArt*®), которые уже внедрены в государственные и частные лечебно-профилактические учреждения на территории Пермского края.

IV. СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. Цифровые модели и инструменты для диагностики трехмерной деформации позвоночника на основе данных стереофотограмметрии / **И. Д. Шитоев**, В. Ю. Столбов, С. В. Муравьев [и др.] // Прикладная математика и вопросы управления / *Applied Mathematics and Control Sciences*. – 2022. – № 4. – С. 60-82.

2. Применение компьютерного зрения для определения реперных точек при оценке нарушения осанки / **И. Д. Шитоев**, В. Н. Никитин, М. Д. Иванова [и др.] // Прикладная математика и вопросы управления / *Applied Mathematics and Control Sciences*. – 2023. – № 4. – С. 94-106.

3. Применение компьютерного зрения для определения реперных точек при оценке геометрии лица / **И. Д. Шитоев**, С. В. Муравьев, М. Д. Иванова, Г. З. Клоян // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2024. – Т. 24, № 3. – С. 16-28.

4. Сравнительная оценка репрезентативности рентгенографического и фотограмметрического методов диагностики деформации позвоночного столба / **И. Д. Шитоев**, С. В. Муравьев, В. Н. Никитин, А. Д. Пастухов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2024. – Т. 23, № 2. – С. 19-28.

Публикации в изданиях WoS, Scopus

5. Эволюция оптической диагностики деформаций позвоночника. Методы и перспективы развития (обзор литературы) / **И. Д. Шитоев**, С. В. Муравьев, Ю. В. Каракулова [и др.] // Гений Ортопедии / *ORTHOPAEDIC QENIUS*. – 2022. – Т. 28, № 5. – С. 734-744.

6. Системы захвата движений: медико-техническая оценка современного этапа развития технологии. Обзор литературы / М. Д. Иванова, С. В. Муравьев,

Г. З. Клоян [и др.] // Спортивная медицина: наука и практика. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 28-40.

7. Сравнительная эффективность компьютерной оптической топографии и клинической фотограмметрии в оценке деформации позвоночника у подростков. Результаты проспективного исследования / **И. Д. Шитоев**, С. В. Муравьев, Ю. В. Каракулова [и др.] // Пермский медицинский журнал. – 2025. – Т. 42, № 3. – С. 96-108.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661234 Российская Федерация. Скрининг система диагностики нарушений осанки / **И. Д. Шитоев**, В. Н. Никитин. – № 2020618130 : заявл. 30.07.2020 : опубл. 21.09.2020.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667399 Российская Федерация. Программное обеспечение для регистрации реперных точек поверхности головы человека методом фотограмметрии / **И. Д. Шитоев**, С. В. Муравьев. – № 2022666812 : заявл. 15.09.2022 : опубл. 20.09.2022.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660190 Российская Федерация. Программное обеспечение для регистрации реперных точек поверхности тела человека методом фотограмметрии / **И. Д. Шитоев**, С. В. Муравьев. – № 2022617931 : заявл. 29.04.2022 : опубл. 31.05.2022.

Патент на изобретение

11. Патент на изобретение № 2805588 Российская Федерация. Способ исследования при деформирующей дорсопатии / **И. Д. Шитоев**, Ю.В. Каракулова, С.В. Муравьев [и др.]. – № 2022125230 : заявл. 26.09.2022 : опубл. 19.10.2023.

Прочие публикации по теме исследований

12. **Шитоев, И. Д.** Применение компьютерного зрения для определения реперных точек для оценки нарушения осанки / И. Д. Шитоев // Искусственный интеллект. Формирование будущего : Материалы I Международной научно-практической конференции, Краснодар, 29 апреля 2024 года. – Краснодар: ИП Алзидан М., 2024. – С. 310–314.

13. **Шитоев, И. Д.** Применение компьютерного зрения для определения реперных точек для оценки геометрии лица / И. Д. Шитоев // Научные достижения и инновационные подходы 2024 : Материалы Международной научно-практической конференции, Краснодар, 10 июля 2024 года. – Краснодар: ИП Алзидан М., 2024. – С. 228–232.